

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
2. Кунец, Г. Высокоскоростная обработка и традиционный технологический базис: преодоление несовместимости / Г. Кунец // Мир техники и технологий. – 2004. – № 6. – С. 35–37.
3. L.N.Lopez de Lacalle, A.Lamikiz. Machine tools for high-performing machining. – Springer, 2009, 442 p.
Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С., Якимович А.М., Ковалева И.Л., Ратько Е.Ф., Трусковский А.С.

МКЭ-АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КРОМОК ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ

ТРУБОПРОВОДОВ

Белорусский национальный технический университет, ОАО «МЗОР»

Минск, Беларусь

С помощью МКЭ проведен модальный и гармонический анализ системы «труба – приспособление» при фрезеровании кромок. Выявлены многочисленные резонансы, построены АЧХ. Обнаружено четыре частотных диапазона, начиная с первого, статического. Общемодельные резонансы расположены во втором диапазоне, а многоволновые резонансы – в четвертом. Установлена малая виброактивность кромок в третьем, межрезонансном диапазоне частот. Здесь следует осуществлять фрезерование кромок в режиме ВСО. Даны технологические и конструктивные рекомендации.

Качественная сварка на магистральных нефте- и газопроводах предполагает точную разделку кромок соединяемых труб. Особенно ответственной является разделка кромок на отводах – изогнутых коротких трубах большого диаметра. Они устанавливаются в самых важных местах – на ветвлениях перекачиваемых потоков возле регулирующей арматуры.

Данная работа связана с разделкой кромок отводов фрезерованием. Инструментом может быть стандартная фасочная фреза. Она преобразует внешнюю и внутреннюю кромки на каждом торце в фаски с прямолинейными образующими. Но для повышения качества сварного шва перспективна фасонная (криволинейная) разделка кромок. Тогда требуется концевая фасонная фреза с оптимизированной геометрией [1].

Основой исследования является конкретная ситуация в серийном производстве отводов и свариваемых из них трубопроводных двойников и тройников. Обработка ведется на крупногабаритном горизонтальном фрезерно-сверлильно-расточном станке МСП6401 марки «МЗОР» [2]. По условиям заказчика фреза устанавливается в шпиндельной головке на консольно выдвигаемом ползуне.

Нами уже проводились работы по моделированию этого станка методом конечных элементов (МКЭ) [3]. Получилось, что приведенная статическая жесткость на конце фрезы невелика. При полностью выдвинутом ползуне она составляет [4]. Тем не менее этого уровня достаточно для качественной обработки жесткой детали точным инструментом практически в любом режиме. Современный подход [5] требует, чтобы жесткость инструмента на режущей кромке была не менее. Итак, общий норматив по жесткости выполняется.

Проблема заключается в податливости обрабатываемой трубы (отвода) и удерживающего его приспособления (рис.1). Показанная система «труба – приспособление» является для заказчика традиционным техническим решением и применена на ряде рабочих мест на станках разных изготовителей. Систему монтируют на вращающемся горизонтальном столе. Стол станка разворачивает по очереди торцы трубы навстречу фрезе.

Система «труба – приспособление» является жесткой статически, но очень возбудимой в динамике. Фрезерование всегда сопровождается исключительным шумом и вибрациями вплоть до потери точности обработки. Требуются динамический анализ системы и рекомендации по её «успокоению».

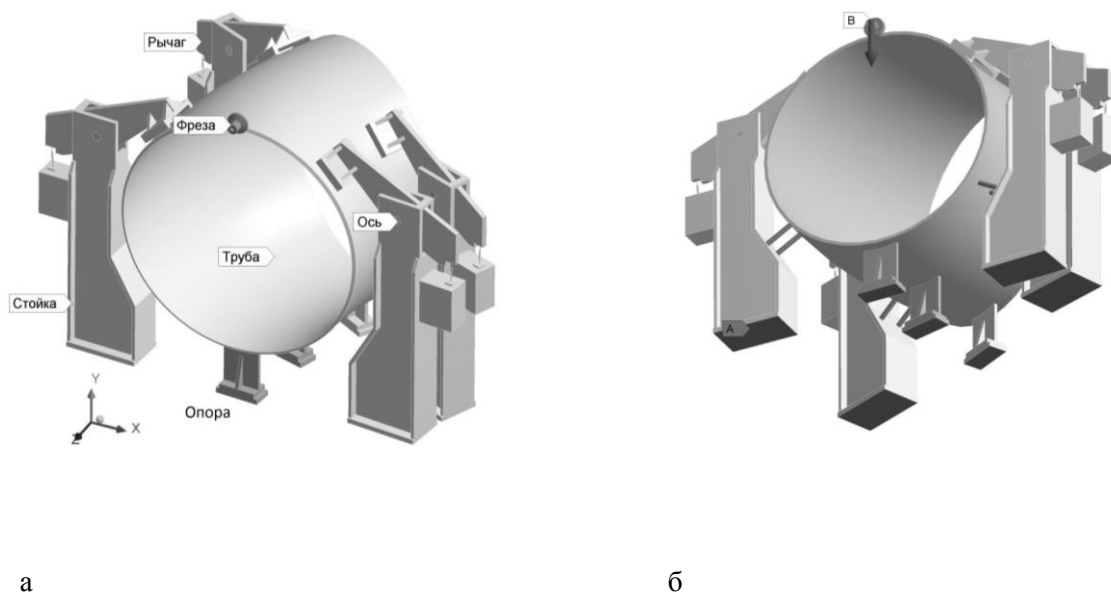


Рис. 1 – Общий вид системы «труба в приспособлении» (а – вид сверху) и граничные условия для неё (б – вид снизу)

Предмет исследования. Основным источником колебаний при фрезеровании является вход зубьев фрезы в обрабатываемый материал. При достаточно плавном входе и выходе сила фрезерования колеблется с частотой

$$f_{\text{фр}} = (n \cdot z_{\text{фр}}) / 60, \text{ Гц}$$

где n – частота вращения фрезы (мин^{-1}), $z_{\text{фр}}$ – число зубьев фрезы.

Величину $f_{\text{фр}}$ будем далее называть частотой фрезы. Прежде всего с такой частотой на инструменте колеблется сила фрезерования $F_{\text{фр}}$, динамически возбуждающая трубу и приспособление.

Далее будут проведены виртуальные испытания МКЭ, в которых будет приложена испытующая сила $F_{\text{и}}$, гармонически колеблющейся с частотой испытания $f_{\text{и}}$. Испытующая сила является идеализацией $F_{\text{фр}}$. Варьирование частоты испытания $f_{\text{и}}$ соответствует работе фрезами с разными числами зубьев на разных частотах вращения шпинделя.

Перед виртуальным возбуждением системы «труба – приспособление» силой (гармонический анализ) будет с помощью МКЭ проведен поиск резонансных частот и форм колебаний (модальный анализ).

Геометрическая модель. Была разработана объемная твердотельная модель системы «труба – приспособление» (рис.1,а). Труба (отвод) является 30-градусным сектором диаметром $\varnothing 1420$ мм с толщиной стенки 21 мм. Труба изогнута по среднему радиусу и опирается снизу на три призматические опоры. Сверху трубу прижимают четыре рычага (вырезанные из стального листа пластины с усилениями). На практике рычаги приводятся в движение гидравликой. В модели гидроцилиндры заменены пружинами соответствующей жесткости.

Рычаги осуществляют прижим, поворачиваясь на осях. Оси базируются в стойках. Каждая стойка является вертикальной стальной сварной балкой коробчатого сечения. Стойки закреплены снизу на предполагаемом жестком столе станка.

Фреза (концевой или фасочный тип) (рис.1,а) смоделирована в своем верхнем положении. Это самая опасная с точки зрения вибраций ситуация. Фреза прижата к торцу трубы и имитирует обработку фаски.

На виде снизу (рис.1,б) маркер А показывает места фиксации стоек и опор. Маркер В указывает на радиальную силу, которая прикладывается к фрезе в рамках гармонического анализа.

Применяемые материалы и параметры модели. Труба и все части приспособления выполнены из стали. Стали независимо от марки имеют модуль упругости $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$ и плотность $\rho = 7850$ кг/м³. Масса всей моделируемой системы равна 2260 кг. Сама труба имеет массу $m_{тр} = 710$ кг.

Демпфирование колебаний в системе было оценено консервативно как невысокое. Принят коэффициент демпфирования $\xi = 2\%$.

Особенности конечно-элементного моделирования. В работе решаются только линейные конечно-элементные задачи. Все тела ведут себя упруго. Зажим трубы полагают идеальным, без проскальзываний и пластических деформаций.

Между рычагами и осями приспособления средствами МКЭ созданы цилиндрические шарниры. Трение в них отсутствует. Каждой пружине, моделирующей гидроцилиндр рычага, приписана рассчитанная жесткость $k_{пр} = 50$ Н/мкм.

В геометрической модели присутствует много солюдов (твердых тел). Например, это труба, рычаги, стойки. В МКЭ-модели связь между прилегающими друг к другу солюдами обеспечивают контактные конечные элементы. Они образуют контактные пары. Обычно им приписан статус “bonded”. Это означает жесткое склеивание соседних конечно-элементных сеток. Статус “bonded” моделирует сварку или неподвижный прижим трением деталей друг к другу.

Кроме вступительного статического расчета было выполнено два вида динамических расчетов – модальный и гармонический анализы. Модальный анализ обнаруживает в заданном частотном диапазоне резонансные моды. Мода – это способ резонансного колебания системы. Мода характеризуется формой колебания и частотой. Это так называемые собственная форма и собственная частота. При умеренном демпфировании термин «собственный» можно считать равнозначным термину «резонансный».

Присутствие резонансной моды указывает на возможность резонанса под действием внешней вынуждающей силы. Степень раскачки зависит от частоты, направления действия и места приложения этой силы. Резонансная раскачка моделируется в ходе гармонического анализа.

При гармоническом анализе трубы в приспособлении прикладывалась только одна сила – на фрезе. Сила полагалась гармонически колеблющейся с частотой испытания f_H . В ходе ряда виртуальных испытаний силе придавали радиальное, тангенциальное или осевое направления. Сила задавалась формулой

$$\bar{F}_H = 1000 \cdot \sin 2\pi f_H$$

Амплитуда силы была равна 1000 Н. При необходимости взять другую амплитуду решение (вследствие его линейности) просто масштабируется.

В модальном и гармоническом анализе сила тяжести и другие нагрузки не рассматриваются.

Сетки конечных элементов состоят из тетраэдров и гексаэдров. Это соответственно 10- и 20-узельные элементы, обладающие квадратичной аппроксимацией перемещений и хорошей точностью. Гексаэдрические конечные элементы использовались для создания регулярных сеток. Например, это конечно-элементная сетка трубы на рис.2,б.

Моделируется два варианта удержания трубы в приспособлении. Это трех- и пятиточечная схемы. Например, на рис.4 показан отвод в виде 90-градусного сектора. При фиксации по трехточечной схеме в каждом опорном сечении действуют рычаги 1, 2 и призматическая опора 3. Это простая схема, используемая на практике. В пятиточечной схеме с внешней и внутренней сторон трубы дополнительно введены опоры 4 и 5, связанные с нижними частями стоек. На рис.4 эти опоры моделируются парами стержней. Данная схема рассматривается далее как способ сдерживания вибраций.

Модальный анализ. В результате модального МКЭ-анализа при трехточечной схеме закрепления трубы было установлено, что резонансные моды начинаются с частот $f_{max} \cong 50$ Гц. Был виртуально исследован диапазон вплоть до $f_{max} \cong 550$ Гц. Этот диапазон будем называть далее рабочим диапазоном. В нем выявлены десятки резонансных мод. Крайние по положению моды показаны на рис.2.

На низких частотах располагаются моды, в которых происходит общее движение приспособления и трубы. Например, на рис.2,а выявляется раскачивание трубы (51,3 Гц) вдоль своей оси. Эта мода (М1) может быть ассоциирована с четвертью периода синусоиды. Так выглядит боковой изгиб стоек. Моды данного типа будем называть далее общекаретными.

На весьма высоких частотах моды становятся многоволновыми. В системе нет единого движения, а осциллирует большое число пучностей. Например, на рис.2,б на частоте 540 Гц стенка трубы малоподвижна возле закрепленной фрезы 1. Но рядом на той же кромке происходят осцилляции в цепочке пучностей 2, 3, 4 (и далее). Пучности работают в противофазе – выпуклости 2 в данный момент времени соответствует вогнутость 3. Через половину периода колебания они меняются местами. На дальнем торце трубы цепочка выпуклостей 5, 6, 7 располагается напротив вогнутостей на ближнем торце. Всего на рис.2,б на каждой кромке в окружном направлении наблюдается семь периодов синусоиды.

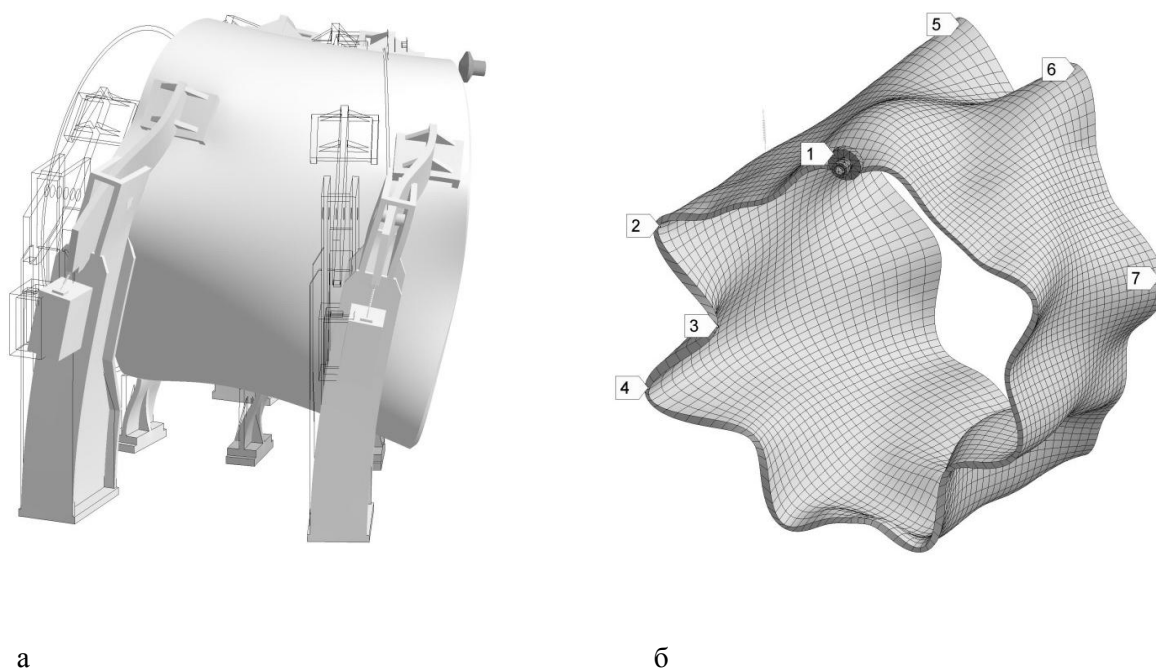


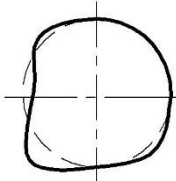
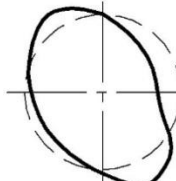
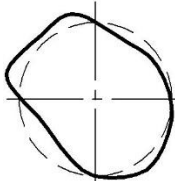
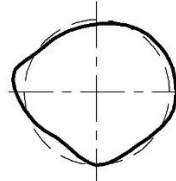
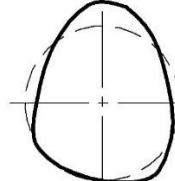
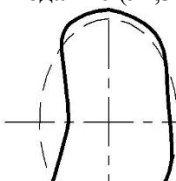
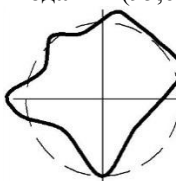
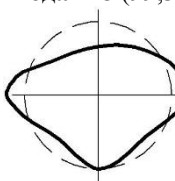
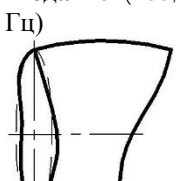
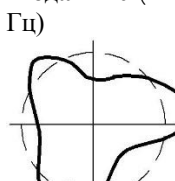
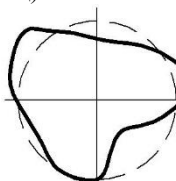
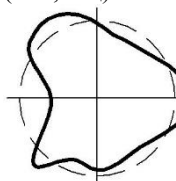
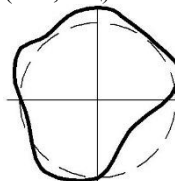
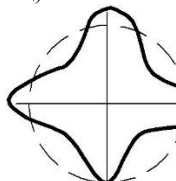
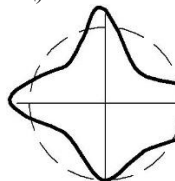
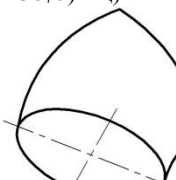
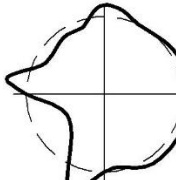
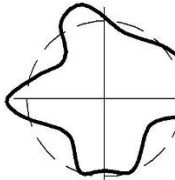
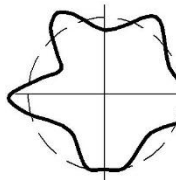
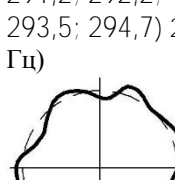
Рис. 2 – Общий четвертьволновой низкочастотный резонанс трубы и приспособления (51,3 Гц) (а) и многоволновой высокочастотный резонанс стенок трубы (540,0 Гц) (б)

Колебательные искажения торцов трубы важны для кромкофрезерования. Они влияют на точность обработки. В табл.1 резонансные искажения торцов показаны для частот до 250 Гц. Найдено 18 мод, связанных с движением кромки трубы. Здесь не учитывались резонансные моды, реализующиеся на удалении от кромок. Например, в табл.1 не отмечены резонансные боковые колебания приводящих концов рычагов.

На рис.3 представлены две интересные моды из средней части рабочего диапазона частот (табл.1). В обоих случаях деформированный профиль оказывается единым по всей длине трубы. Для моды М14 возникает ($f_{\max} = 138,4 \text{ Гц}$) 4-лучевая звездочка (четыре периода синусоиды). По торцу наблюдаются четыре выпуклости и четыре впадины. Они все являются пучностями и колеблются в противофазе. Когда фрезу подбрасывает вверх, прижимы на рычагах «клюют» вниз, внутрь трубы, и наоборот. Мода М14 связывает колебания трубы и приспособления в единую систему из синфазных и противофазных движений.

Для более высокочастотной моды М18 ($f_{\max} = 231,8 \text{ Гц}$) собственной формой движения является пятилучевая звездочка. Подчеркнем, что выявление моды указывает на возможность резонанса. Насколько сильно гармоническое действие фрезы возбуждает этот резонанс, выясняется отдельно, в ходе гармонического анализа. Забегая вперед сообщим, что мода М14 возбуждается сильно, в то время как мода М15 приводит к небольшим колебаниям кромок трубы.

Таблица 1 - Модальные рисунки колебаний торцов трубы (трехточечная схема закрепления)

<p>Мода M1 (51,3 Гц)</p>  <p>Качание трубы вдоль оси Z</p>	<p>Мода M2 (71,7 Гц)</p>  <p>Закручивание трубы над центральной опорой вокруг оси Y</p>	<p>Мода M3 (75,3 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы - овал</p>	<p>Мода M4 (92,2 Гц)</p>  <p>Хлопки трубы и раскачка внутренних рычагов</p>	<p>Мода M5 (92,3 Гц)</p>  <p>Хлопки и пережат по верху трубы и раскачка наружных рычагов</p>
<p>Мода M6 (94,3 Гц)</p>  <p>Хлопок наружной стороны трубы</p>	<p>Мода M7 (95,6 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы - треугольник</p>	<p>Мода M8 (99,3 Гц)</p>  <p>Хлопки и пережат наружной стороны трубы</p>	<p>Мода M9 (105,1 Гц)</p>  <p>Кручение трубы по оси Y + хлопки профиля</p>	<p>Мода M10 (112,8 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы - трилистник</p>
<p>Мода M11 (114,2 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы – два трилистника в противофазе по торцам трубы</p>	<p>Мода M12 (117,2 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы – две стрелки в противофазе по торцам трубы</p>	<p>Мода M13 (119,1 Гц)</p>  <p>Хлопок внутренней стороны трубы</p>	<p>Мода M14 (138,4 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы – крестообразная фигура</p>	<p>Мода M15 (149,4 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы – две крестообразные фигуры в противофазе по торцам трубы</p>
<p>Мода M16 (182,4; 182,8; 184,8; 186,6) Гц)</p>  <p>Синхронная раскачка концов рычагов по нескольким рисункам на близких частотах (кластер мод)</p>	<p>Мода M17 (200,2 Гц)</p>  <p>Звездообразная пульсация профиля по внешней стороне трубы</p>	<p>Мода M18 (206,8 Гц)</p>  <p>Сочетание крестообразных пульсаций трубы и ее вертикальных закручиваний</p>	<p>Мода M19 (231,8 Гц)</p>  <p>Пульсация профиля трубы – пятилучевая звезда</p>	<p>Мода M20 ((233,6; 251,7; 278,5; 291,2; 292,2; 293,5; 294,7) 295,6 Гц)</p>  <p>20 пучностей на трубе + раскачка рычагов и стоек по полуволновой схеме</p>

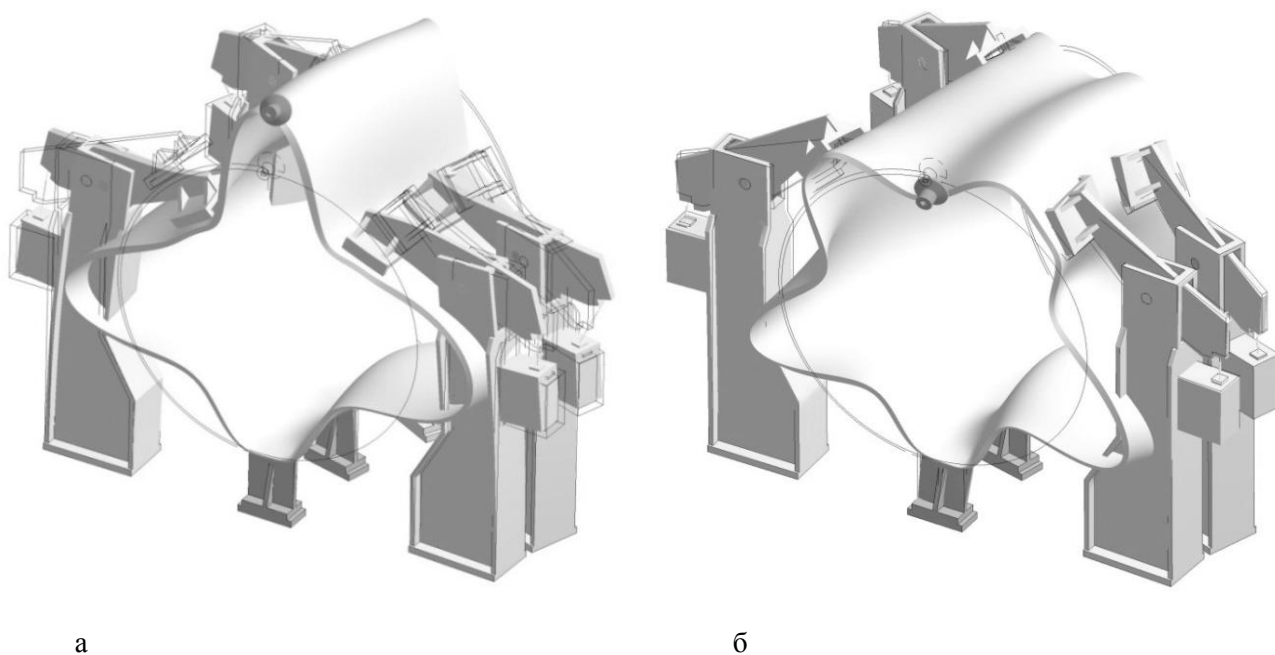


Рис. 3 – Резонансные моды с четырьмя (а; M14) и пятью (б; M18) периодами волн на торце трубы (частоты 138,4 Гц и 231,8 Гц соответственно)

Ситуация с распространением высокочастотных резонансных волн в обход опорных точек и прижимов сохраняется и для труб (отводов) других размеров. Всего 90-градусный сектор-трубу (рис.4) удерживают шесть рычагов, семь призм и 12 пар дополнительных опор.

На достаточно большой частоте (430,6 Гц) резонансные колебания адаптируются ко всем точкам закрепления и «обходят» их. Пучности имеют возможность довольно свободно искажать профиль кромок трубы (6-волновые звездочки).

Гармонический МКЭ-анализ и расчетная АЧХ станка. АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) строилась путем выполнения ряда гармонических МКЭ-решений с шагом 5 Гц. Входом была вынуждающая сила \bar{F}_H , приложенная на фрезу. Частота испытания f_H менялась в рабочем диапазоне от 5 до 400 Гц. Выходом было радиальное перемещение фрезы. Коэффициент демпфирования $\xi = 0,02$ (2%).

АЧХ на рис.5 была получена при радиальном направлении силы. Амплитуда силы была равна 1000 Н. Труба была закреплена по пятиточечной схеме, которая более жестка, чем трехточечная схема, применявшаяся при построении табл.1. Поэтому частота резонансных мод на АЧХ немного сдвинуты вверх относительно табл.1 (приблизительно на 20 Гц в нижней половине частотного интервала).

На АЧХ выявлено четыре диапазона, отмеченные маркерами. Диапазон 1 (статический) находится в интервале от 0 до ~60 Гц и соответствует почти статическому поведению трубы и приспособления. В нем для оценки точности обработки достаточно знать силы резания на фрезе и приведенные к зоне резания статические жесткости инструмента и трубы.

Диапазон 2 (общемодельные резонансы) располагается в интервале от ~60 до ~170 Гц. На АЧХ он характеризуется пиками колебательных перемещений. Каждый пик соответствует раскачке системы «труба в приспособлении» по определенной моде. Не все моды из 18 мод, отмеченных в табл.1, оказались возбуждающимися. Обнаружено только шесть выраженных общемодельных резонансов

Диапазон 3 (от ~170 до ~350 Гц) назовем межрезонансным (по отношению к диапазону 2 он является зарезонансным). В диапазоне 3 колебания силы резания на фрезе слишком часты, чтобы возбудить всю систему в целом. Труба становится малоподвижной и оказывается удобным объектом для обработки. Линия АЧХ лежит в зарезонансном диапазоне в 2 – 3 раза ниже, чем в статическом диапазоне.

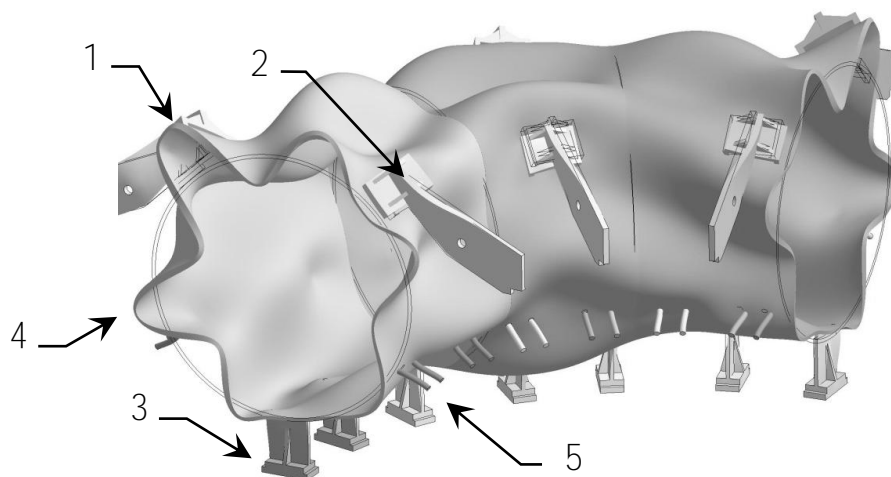


Рис. 4 – Многоволновой резонанс 90-градусного отвода (трубы) на частоте 430,6 Гц

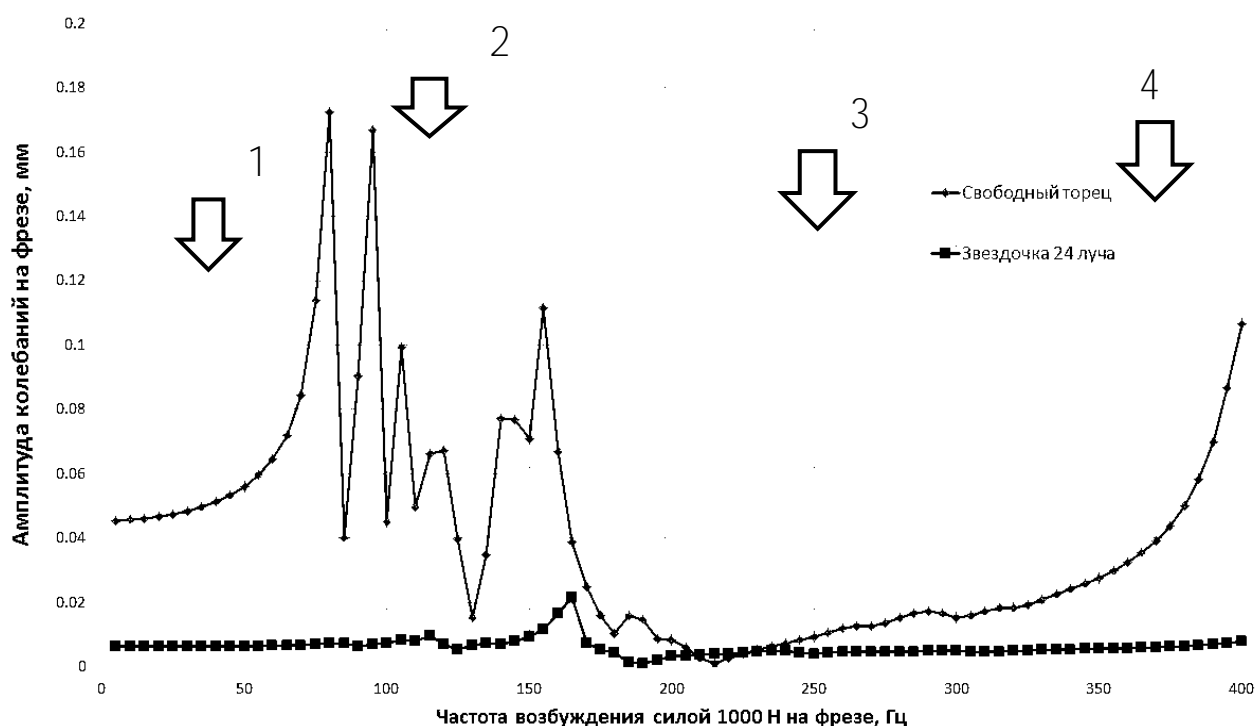


Рис. 5. – АЧХ «радиальная сила – радиальное перемещение фрезы» для случаев свободного торца (верхняя линия) и поддержки торца 24-лучевой звездой (нижняя линия)

Следовательно, во столько же раз динамическая жесткость трубы ниже статической. Диапазон перспективен с точки зрения высокоскоростной обработки (ВСО) [6]. Точное фрезерование следует осуществлять фасонной концевой фрезой малого диаметра. Тогда её возбуждающая частота попадет именно в зарезонансный диапазон, спокойный с точки зрения динамической раскачки трубы и приспособления.

Диапазон 4 (выше ~350 Гц) связан с многоволновыми резонансами, например, как на рис.4. На трубе в осевом и окружном направлениях укладывается много периодов синусоиды. На стенках трубы и, в частности, на кромках возникает много пучностей. При обходе кромок фреза регулярно попадает на пучности и может возбудить резонанс. Возбуждение будет сильным, но локализованным вокруг фрезы. Поэтому линия АЧХ опять может подниматься на рис.5 в диапазоне 4.

Разницу между общемодельными и многоволновыми резонансами иллюстрирует рис.6. На рис.6,а показан один из резонансов в диапазоне 2 (80 Гц). Фреза находится на пучности в верхней части торца трубы. Амплитуда суммарного перемещения составляет 170,32 мкм. Сопоставимые перемещения наблюдаются и на других пучностях того же торца. Например, на нижней стороне

трубы есть пучность с амплитудой 80,195 мкм. При этом приводящие концы рычагов раскачиваются (даже на 263,89 мкм). Следовательно, в колебания вовлечена вся система «труба – приспособление».

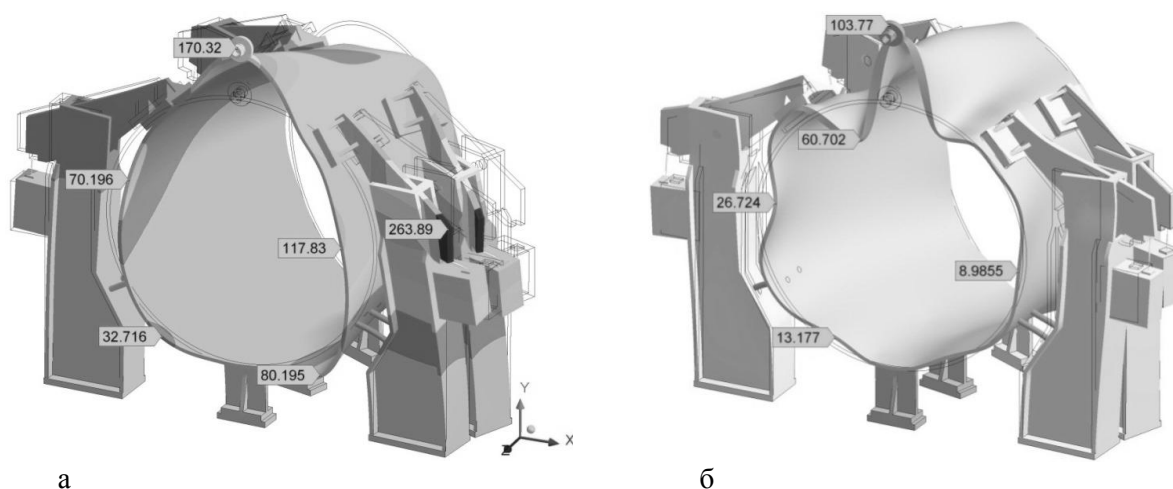


Рис. 6 – Возбуждение резонансных колебаний (маркеры – суммарные перемещения в мкм) гармонической радиальной силой в частотных диапазонах 2 (а, 80 Гц;×2400) и 4 (б, 400 Гц;×4200)

На рис.6,б показано резонансное возбуждение на частоте 400 Гц в диапазоне 4. Перемещение пучности при фрезе составляет 103,77 мкм. Это сопоставимо с предыдущим рисунком. На кромке видны еще пучности, объединенные в шесть периодов. Но при удалении от фрезы перемещения в пучностях быстро затухают. Внизу трубы маркер показывает только 13,177 мкм. Стойки и рычаги малоподвижны. Следовательно, многоволновой диапазон 4 опасен для точности обработки, но только из-за локальных колебаний стенки трубы непосредственно возле фрезы. Остальные части конструкции виброактивны больше в акустическом, чем в производственном смысле.

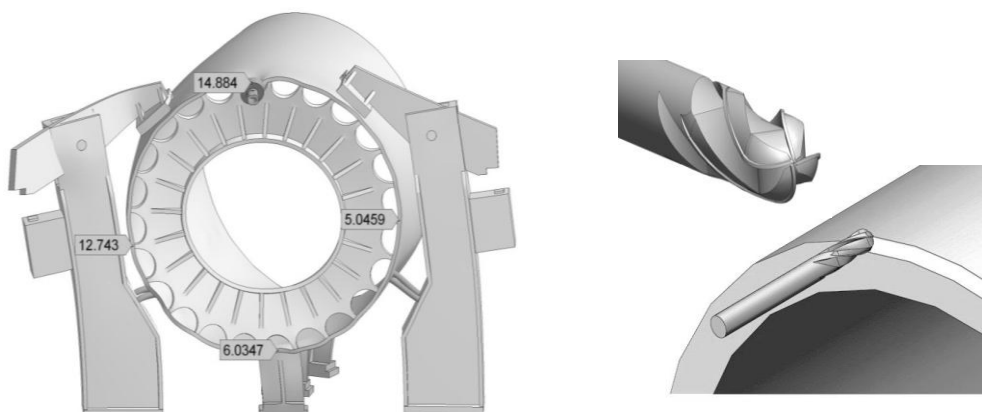


Рис. 7 – Резонансные колебания трубы с 24-лучевым усилителем – «звездой» на торце (115 Гц;×16000) и рекомендуемая для ВСО кромки фасонная фреза (б)

Рекомендуемые решения. Первой, довольно простой рекомендацией является работа фрезой в статическом диапазоне частот. Тогда резонансы не возбуждаются, акустические сигналы излучаются слабо. Статический диапазон частот рекомендуется расширить. Для этого нужно применять пятиточечную схему закрепления вместо трехточечной. Дополнительными конструктивными мерами являются усиление стоек и изготовление рычагов коробчатой формы вместо существующей пластинчатой. Модальный анализ показал, что многие резонансные моды связаны с поперечной раскачкой рычагов.

Вторая рекомендация заключается в переходе к высокоскоростной обработке (ВСО) [6] и использовании межрезонансного диапазона. В этом случае частота фрезы достаточно велика, чтобы не возбуждать общей раскачки конструкции. Обеспечивается динамическая жесткость и,

следовательно, точность обработки. В то же время, ещё не наступает многоволновой раскочки пучностей стенок трубы. Осуществить обработку можно с помощью быстро вращающейся фасонной концевой фрезы (рис.7,б).

Третья рекомендация состоит во временном конструктивном усилении обрабатываемого торца трубы. Это можно осуществить с помощью технологического диска – «звезды» (24-лучевая звезда показана стилизованно на рис.7,а). Диск сдерживает свободные колебания торца. Более того, он поднимает статическую жесткость трубы. В результате, линия АЧХ при наличии «звезды» проходит ниже. Пики общих резонансов ослабляются и сдвигаются в область более высоких частот. Благодаря диску – «звезде» в рассмотренном интервале частот многоволновые резонансы возле кромки не наблюдаются. Применение этого усиления связано с издержками и затратами времени на снятие и установку диска.

Четвертая рекомендация заключается в оптимизации винтовой геометрии фасонной фрезы (сочетаемо с работой в зарезонансном диапазоне). Требуется плавность работы инструмента и хорошее сцепление зубьев с трубой через зоны резания. Тогда станок, ползун, фреза и труба с приспособление в большей степени замыкаются в контур жесткости и противодействуют вибрациям.

Выводы.

Обнаружена система обшемодельных резонансов на частотах $\sim 50 - 150$ Гц, которая представляет основную опасность для качественного кромкофрезерования (диапазон 2).

Выявлена система многоволновых резонансов стенок трубы, начинающаяся с частот ~ 350 Гц (диапазон 4). Возникают многочисленные пучности, которые практически невозможно сдержать, так как они обходят точки крепления трубы. Работа в данном диапазоне нежелательна по соображениям точности и исключительной шумности.

В межрезонансном диапазоне 3 на частотах $150 - 350$ Гц не выявлено возбуждаемых, активных резонансных мод. Именно на этих частотах рационально вести кромкофрезерование.

Для качественного фрезерования кромок с малыми вибрациями в межрезонансном диапазоне следует перейти к стратегии ВСО и применять специальные скоростные концевые фрезы с фасонной формой и оптимизированными винтовыми зубьями.

Для черного кромкофрезерования рекомендуется работать в низкочастотном, статическом диапазоне 1 (до ~ 50 Гц). Здесь резонансная раскочка отсутствует. Статический диапазон можно расширить до $60 - 70$ Гц переходом от трехточечной схемы закрепления трубы к пятиточечной. Дальнейшее увеличение числа точек крепления малоэффективно.

Сильным, но затратным средством подавления вибраций при фрезеровании кромок является установка в торце трубы жесткого технологического диска – «звезды». Диск в несколько раз повышает статическую и динамическую жесткость кромок трубы. Однако монтаж и подгонка лучей «звезды» потребует существенного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Кочергин, Е.Ф. Ратько «Математическая модель образования режущего клина концевой сферической фрезы с постоянными передними и задними углами вдоль режущей кромки» // «Машиностроение». – 2014. – №28.
www.mzor.com
2. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
3. Баланс жесткости стойки фрезерно-сверлильно-расточного станка с симметричным расположением шпиндельной бабки / В.И. Туромша, С.С. Довнар, А.С. Трусовский, И.И. Шумский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О.Сухого. – 2012. – №3(50). – С.19–29.
4. L.N.Lopez de Lacalle, A.Lamikiz. Machine tools for high-performing machining. – Springer, 2009, 442 p.
5. Кунец, Г. Высокоскоростная обработка и традиционный технологический базис: преодоление несовместимости / Г. Кунец // Мир техники и технологий. – 2004. – № 6. – С. 35–37.